

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 50 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

THE INFLUENCE OF NANOSTRUCTURIZING DEFORMATION-THERMAL TREATMENT ON STRAINING AND FRACTURE FEATURES OF QUENCHED GRADE 50 STEEL UPON STATIC AND CYCLIC LOADING

Р.А. Саврай, А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина, Н.А. Давыдова
ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
ras@imach.uran.ru

Abstract

Straining and fracture features upon static and cyclic loading of quenched grade 50 steel (with 0.51 wt.% of C) subjected to nanostructuring deformation-thermal treatment, which includes frictional treatment and optimized tempering at temperature of 350°C have been investigated. It is established that combined nanostructuring treatment alters the character of development of a plastic yielding upon loading and makes it more uniform. This is expressed in disappearance of the yield point elongation at the early stage of deformation upon static tension and in suppression of formation of a deformation relief caused by action of shear and rotary deformation modes in volume of a material upon cyclic tension. At that in spite of appearance of cracks the hardened by means of deformation-thermal treatment surface layer of grade 50 steel doesn't completely fracture (doesn't flake) throughout the process of cyclic loading and keeps high ability to resist contact mechanical action.

1. Введение

Одной из важнейших задач современного машиностроения является обеспечение необходимой работоспособности и долговечности изделий в заданных условиях эксплуатации. Для решения этой проблемы широко используются различные способы обработки поверхности, которая во многих случаях, например при эксплуатации изделий в условиях циклического нагружения, играет определяющую роль в обеспечении их работоспособности. Однако, упрочнение поверхности в зависимости от способа воздействия на нее может сопровождаться нежелательными побочными явлениями (например, снижением пластичности и увеличением склонности к разрушению). Эффективным способом устранения недостатков, присущих тому или иному способу поверхностного упрочнения деталей, является использование комбинированных методов обработки, включающих в себя воздействие на обрабатываемую поверхность нескольких факторов. К таким обработкам можно отнести комбинированную деформационно-термическую обработку, сочетающую поверхностное упрочнение методом интенсивного пластического деформирования и последующее термическое воздействие, улучшающее пластические свойства предельно упрочненного материала [1]. В настоящей работе исследованы особенности деформирования и разрушения при статическом и циклическом растяжении закаленной стали 50 (0,51 % С), подвергнутой комбинированной деформационно-термической обработке по оптимальному режиму, включающему фрикционную обработку с последующим отпуском при температуре 350 °С.

2. Материал и методика эксперимента

Образцы из стали 50 (0,51 %С) подвергали закалке от 850°С в масле индустриальное И-12. После закалки проводили комбинированную де-

формационно-термическую обработку, включающую наноструктурирующую фрикционную обработку с последующим отпуском при 350°С. Фрикционную обработку рабочей части (25×7 мм) плоских образцов толщиной 2,7 мм осуществляли на воздухе при сканировании полусферическим индентором из твердого сплава ВК-8 при нагрузке 588 Н. Для сравнения термической и комбинированной деформационно-термической обработок часть образцов после закалки подвергали отпуску при 350°С в течение 1 часа.

Механические испытания на статическое и циклическое растяжение проводили на установке Instron 8801. Циклическое нагружение проводили с контролируемой величиной общей деформации $\epsilon_{\text{общ}} = 2\epsilon_a = \epsilon_{\text{упр}} + \epsilon_{\text{пл}} = 0,022$ (ϵ_a – амплитуда полной деформации цикла; $\epsilon_{\text{упр}}$ – амплитуда упругой деформации цикла; $\epsilon_{\text{пл}}$ – амплитуда пластической деформации цикла), коэффициентом асимметрии цикла $R_\epsilon = 0$ (знакопостоянное от нулевого растяжение), изменением амплитуды деформации цикла по пилообразному закону, частотой нагружения 0,5 Гц. При этом испытания осуществляли таким образом, чтобы коэффициенты асимметрии цикла как по деформации (R_ϵ), так и по напряжению (R_σ) оставались равны нулю на протяжении всего процесса нагружения ($R_\sigma = R_\epsilon = 0$). Испытывали образцы с количеством циклов нагружения N равным 10, 50, 200, 900 и 1200.

Поверхности образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением микроскопа Tescan VEGA II XMU. Микротвердость измеряли на микротвердомере Leica VMHT при нагрузке на индентор 0,245 Н. Ширину рентгеновской линии (110) α определяли на рентгеновском дифрактометре SHIMADZU XRD-7000 в Cr-K α излучении. Кинетическое микроиндентирование с записью диаграммы нагружения

проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 XYm при максимальной нагрузке 0,245 Н.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Влияние комбинированной деформационно-термической обработки на микротвердость, ширину рентгеновской линии и механические характеристики закаленной стали 50. Из табл. 1 следует, что по сравнению с термической обработкой комбинированная деформационно-термическая обработка приводит к резкому повышению микротвердости поверхности закаленной стали 50 (от 460 до 1000 HV_{0,025}). Это обусловлено не только сильным диспергированием мартенситной структуры вплоть до нанокристаллического

состояния [1], но также протеканием в кристаллах тетрагонального мартенсита деформационного динамического старения, приводящего к закреплению возникающих при фрикционной обработке многочисленных дислокаций сегрегациями из атомов углерода [2]. Более значительная плотность дислокаций в деформированной стали сохраняется и после отпуска при температуре 350 °С, на что указывает повышенное значение интегральной ширины рентгеновской линии α -фазы у стали после деформационно-термической обработки ($B=37,5$ мин) по сравнению с термической обработкой ($B=30,5$ мин) (см. табл. 1).

Таблица 1

Микротвердость HV_{0,025}, интегральная ширина B рентгеновской линии (110) α , прочностные (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление разрыву σ_B , напряжение разрушения σ_K) и пластические (равномерное δ_p и общее δ_K удлинение) характеристики при статическом растяжении стали 50 после различных обработок

Обработка	HV _{0,025}	B, мин	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	σ_K , МПа	δ_p , %	δ_K , %
1	460±10	30,5	1420	1550	1280	3,2	10,7
2	1000±30	37,5	1440	1570	1390	2,9	6,9

1 – Термическая обработка (закалка+отпуск 350°С)

2 – Комбинированная деформационно-термическая обработка закаленной стали

σ , МПа

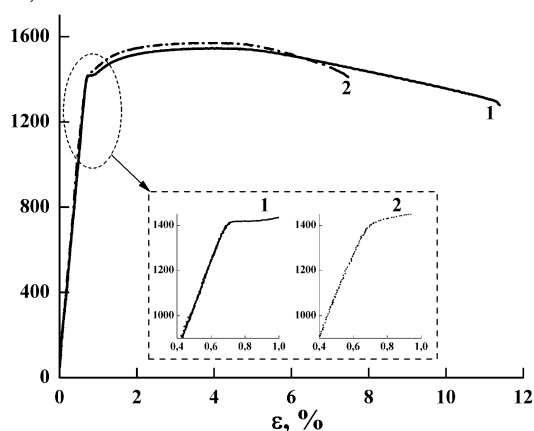


Рис. 1. Кривые нагружения стали 50 при одноосном растяжении: 1 – после термической обработки; 2 – после наноструктурирующей комбинированной деформационно-термической обработки

Как следует из табл. 1, комбинированная деформационно-термическая обработка закаленной стали 50 несколько повышает прочностные характеристики по сравнению с термической обработкой: предел текучести и временное сопротивление разрыву возрастают на 20 МПа, напряжение разрушения – на 110 МПа. При этом равномерное удлинение δ_p практически не изменяется, общее удлинение δ_K снижается на 3,8 %, оставаясь при этом достаточно высоким ($\delta_K=6,9$ %). Комбинированная деформационно-термическая обработка оказывает существенное влияние на вид кривой нагружения стали (рис. 1), заключающееся в исчезновении площадки текучести образцов. Это свидетельствует о более равномерном течении образца после ком-

бинированной деформационно-термической обработки на начальном этапе пластического деформирования при статическом растяжении.

3.2. Влияние комбинированной деформационно-термической обработки на особенности деформирования и разрушения закаленной стали 50 в процессе циклического нагружения. Изучение на электронном сканирующем микроскопе поверхностей образцов после циклического растяжения показывает, что на электрополированной поверхности образца из стали 50, подвергнутого термической обработке (закалка + отпуск 350 °С), наблюдается деформационный рельеф (рис. 2,а), обусловленный действием в объеме материала

сдвиговых и поворотных мод деформации (образуются мезовихри). При числе циклов нагружения $N=200$ и более (рис. 2,б) на поверхности также наблюдается образование протяженных усталостных трещин, по-видимому, являющихся результатом зигзагообразных сдвигов - мезополос локализованной деформации, распространяющихся по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений [3]. На поверхности термообработанной стали после циклического нагружения появляются также поры (указаны стрелками на рис. 2) как результат релаксации напряжений, создаваемых при образовании мезовихрей [3].

В условиях циклического растяжения в результате комбинированной обработки происходит подавление образования деформационного рельефа, обусловленного действием в объеме материала сдвиговых и поворотных мод деформации. На поверхности образцов, подвергнутых деформационно-термической обработке (закалка, фрикционная обработка, отпуск при $350\text{ }^{\circ}\text{C}$), наблюдаются только обусловленные действием нормальных напряжений трещины (рис. 2,в), обусловленные релаксацией напряжений, возникающих на границе раздела «поверхностно упрочненный слой – подложка» [4]. С увеличением числа циклов нагружения количество возникающих под действием нормальных напряжений микротрещин и их протяженность по-

степенно увеличиваются (рис. 2,г). Однако при этом упрочненный поверхностный слой полностью не разрушается (не отслаивается) на протяжении всего процесса усталостного нагружения ($N=10\text{--}1200$ циклов) и сохраняет более высокую стойкость к контактному воздействию. Об этом свидетельствует сохранение повышенных уровней удельной контактной твердости $H_{\text{ГТ}}/E^*$ упругого восстановления R_e и отношения $H_{\text{ГТ}}^3/E^{*2}$ после циклического нагружения (рис. 3). отношение твердости вдавливания к контактному модулю упругости $H_{\text{ГТ}}/E^*$ (удельная контактная твердость) [5] и упругое восстановление $R_e = ((h_{\text{max}} - h_p)/h_{\text{max}}) \times 100\%$ [6] характеризуют упругую деформацию (долю упругой деформации в общей деформации) и, соответственно, способность материала сопротивляться нагружению без пластического деформирования. Отношение H^3/E^{*2} принято считать качественной сравнительной характеристикой сопротивления пластической деформации, поскольку напряжение течения пропорционально указанному отношению ($P_y \sim H^3/E^{*2}$) [7]. Отношения $H_{\text{ГТ}}/E^*$ и H^3/E^{*2} являются универсальными характеристиками, позволяющими сравнивать материалы различных классов, поскольку сопротивление материала механическому воздействию зависит как от его твердости, так и от модуля упругости.

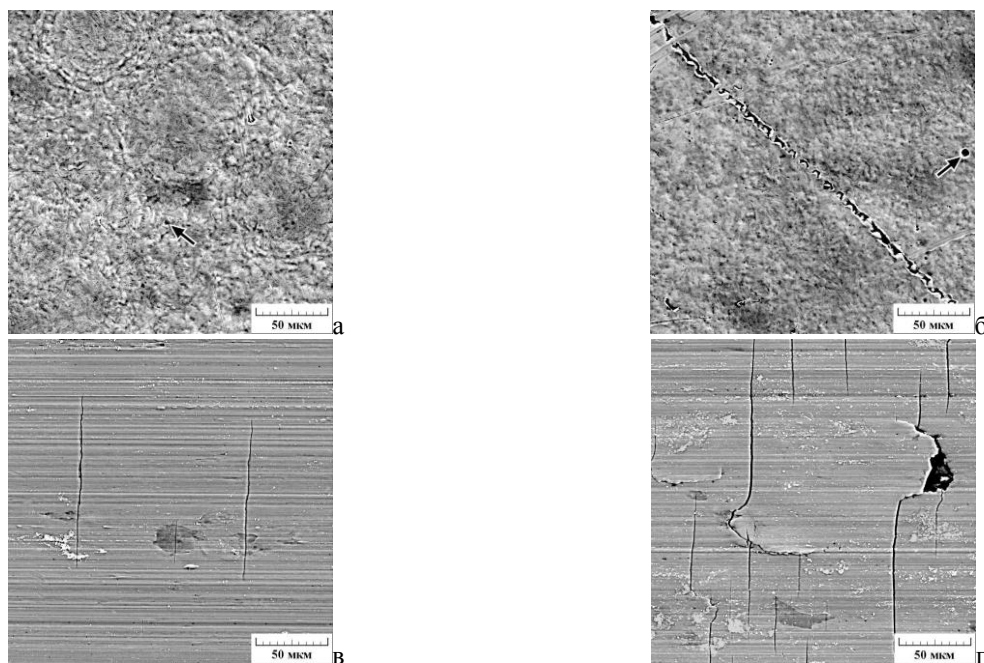


Рис. 2. Электронные микрофотографии (РЭМ) поверхностей образцов из стали 50 после термической (а, б) и наноструктурирующей комбинированной деформационно-термической (в, г) обработок, подвергнутых циклическому нагружению (испытания на циклическое от нулевого растяжение с контролем по деформации) с числом циклов $N=10$ (а, в) и 900 (б, г)

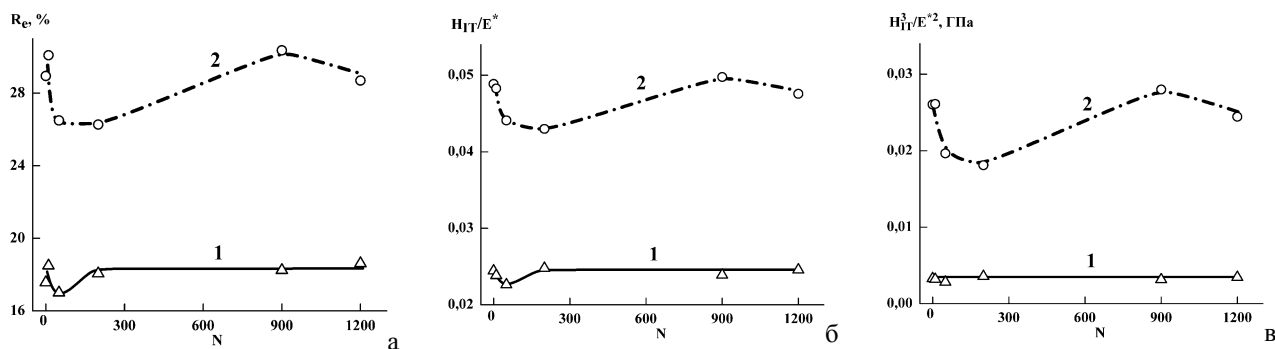


Рис. 3. Влияние числа циклов нагружения N на упругое восстановление R_e (а), отношения H_T/E^* (б) и H_T^3/E^{*2} (в) при микроиндентировании поверхности стали 50: 1 – после термической обработки; 2 – после наноструктурирующей комбинированной деформационно-термической обработки

Закключение. Установлено, что наноструктурирующая деформационно-термическая обработка закаленной стали 50 изменяет характер развития пластического течения материала при деформировании в условиях статического и циклического нагружения по сравнению с обычной термической обработкой, делая его более равномерным. При статическом растяжении это проявляется в исчезновении площадки текучести на кривой нагружения, а при циклическом – в подавлении образования деформационного рельефа, обусловленного действием в объеме материала сдвиговых и поворотных мод деформации. При этом упрочненный наноструктурированный поверхностный слой, несмотря на появление трещин, не разрушается полностью (не отслаивается) на протяжении всего процесса усталостного нагружения и сохраняет повышенную способность сопротивляться механическому контактному воздействию, о чем свидетельствуют результаты микроиндентирования.

Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 12-П-1-1027 (по программе Президиума РАН № 25) и гранта РФФИ № 11-08-01025-а.

Список литературы

1. Макаров А.В., Поздеева Н.А., Саврай Р.А., Юровских А.С., Малыгина И.Ю. Влияние фрикционной и комбинированных деформационно-термических обработок на трибологические и механические свойства закаленной конструкционной стали // Изв. Самарского научного центра РАН. 2011, Т.13, №4(3). С. 799-804.
2. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Прочность и износостойкость нанокристаллических структур поверхностей трения сталей с мартенситной основой // Известия Вузов. Физика. – 2004. – №8. – С.65–80.
3. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Попкова Ю.Ф. Стадийность многоуровневого развития усталостных трещин как нелинейного автоволнового процесса поворотного типа // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т.13, №6. – С. 13-25.
4. Панин В.Е., Слосман А.И., Антипина Н.А., Литвиненко А.В. Влияние внутренней структуры и состояния поверхности на развитие деформации на мезоуровне малоуглеродистой стали // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т.4. – №1. – С.105–110.

5. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П. Установление предельных значений твердости, упругой деформации и соответствующего напряжения материалов методом автоматического индентирования // Материаловедение. – 2008. – №8. – С.15–21.

6. Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей // Матер. ХМеждун. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России». – М.: ЦНИТИ «Техномаш», 2004. – С.311-318.

7. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V.174–175. – P.725–731.